

Рекомендации по контролю точности на различных этапах фотограмметрической обработки в системе PHOTOMOD

Служба технической поддержки, «Ракурс», обновлено 01.12.2022 г.

Данное руководство базируется на «Инструкции по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов» (Москва, ЦНИИГАиК, 2002), утвержденной Федеральной службой геодезии и картографии России.

Система PHOTOMOD позволяет производить контроль выполненных операций на всех этапах обработки проекта. Ниже приведен список рекомендаций и допусков на различных этапах работы с проектом.

1.1 Редактор камер. Внутреннее ориентирование.

После добавления снимков в проект, необходимо завести камеру в Редакторе камер и выполнить внутреннее ориентирование снимков. Этот процесс различается для аналоговых и цифровых камер.

Для изображений, полученных аналоговой камерой, внутреннее ориентирование выполняется путем измерения координатных меток на полях снимков. В случае наличия координат меток вычисляются ошибки внутреннего ориентирования вдоль обеих осей.

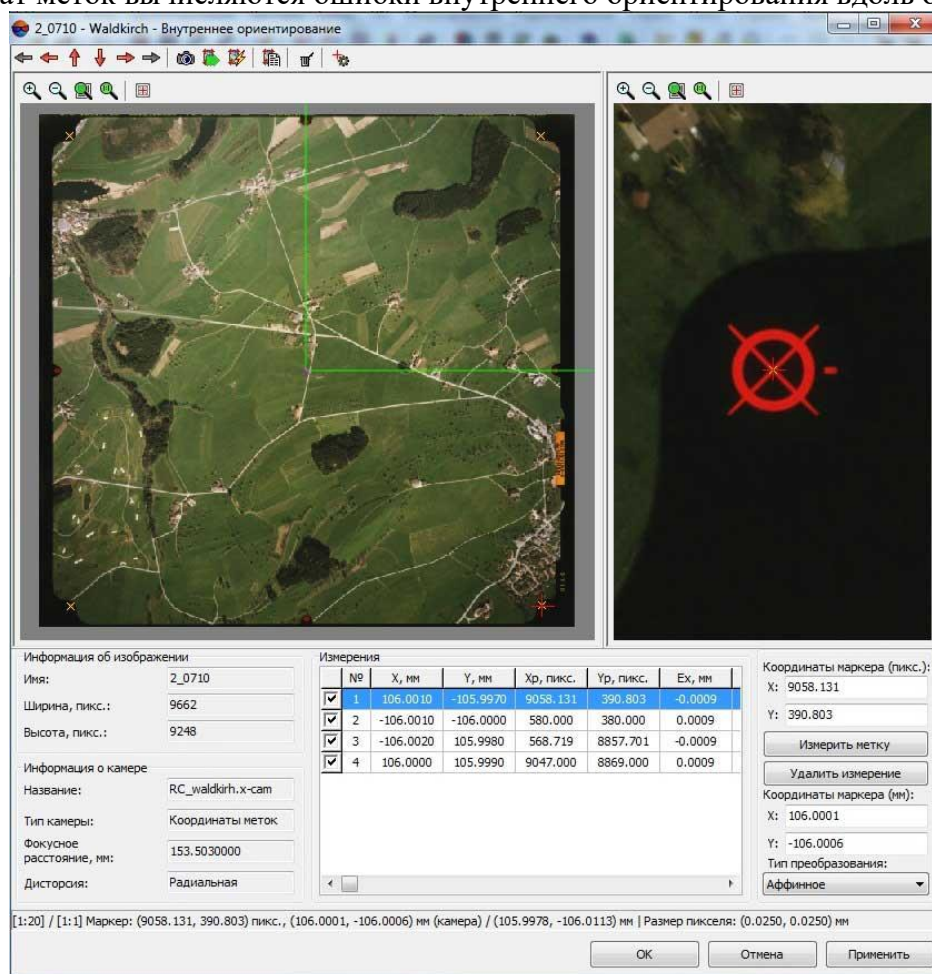


Рис. 1.1. Внутреннее ориентирование

Если сканирование выполнялось фотограмметрическим сканером, то допустимое значение максимальной ошибки не должно превышать размер пиксела. То есть, если в результате сканирования размер пиксела составляет 12 мкм, то максимальная ошибка не должна превышать этого значения.

Для изображений, полученных цифровой камерой, внутреннее ориентирование выполняется в автоматическом режиме и сводится к вводу элементов внутреннего ориентирования из паспорта камеры.

1.2 Измерение точек сети триангуляции

Процесс взаимного ориентирования подразумевает:

- измерение связующих точек на стереопарах и в зонах тройного перекрытия;
- измерение межмаршрутных связующих точек;
- распознавание и измерение опорных точек.

При определении элементов взаимного ориентирования оптимальным вариантом считается измерение 12-18 связующих точек на стереопаре (по 2-3 точки в каждой из 6 стандартных зон, см. рис 1.2), если измерения выполняются вручную. При автоматическом измерении связующих точек мы можем задавать большее количество точек для измерения на каждой стереопаре, и за счет этого равномерно распределять их по области перекрытия с учетом особенностей снимаемого объекта. См. рис. 1.3.

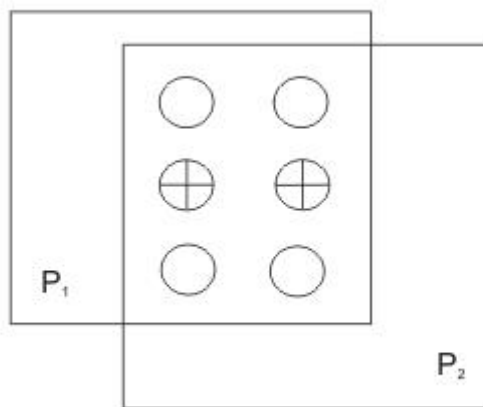


Рис. 1.2. Схема расположения стандартных зон

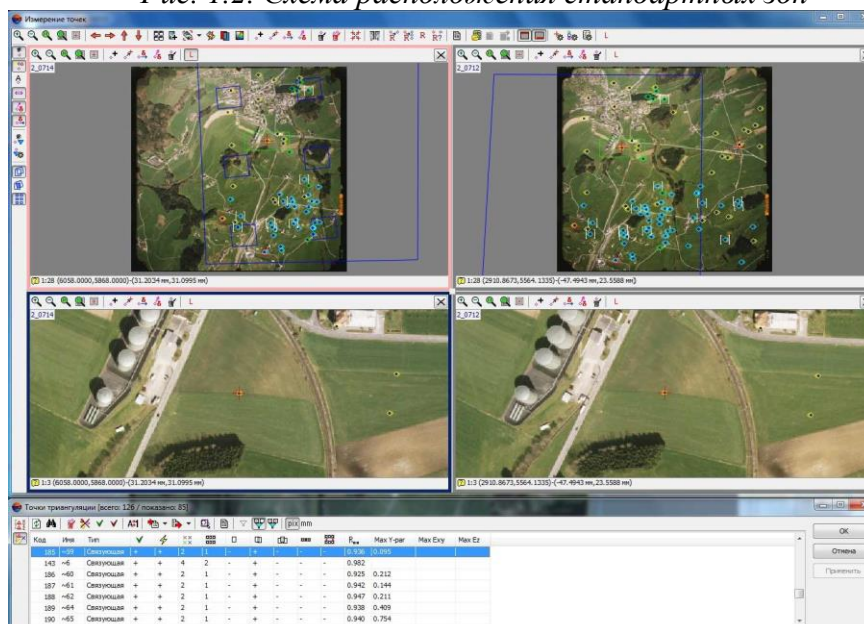


Рис. 1.3. Измерение связующих точек по всей области перекрытия стереопары

Также, рекомендуется следить, чтобы точки, попадающие в зону тройного перекрытия, были, по возможности, распределены равномерно «вдоль» этой зоны.
 В ЦФС PHOTOMOD рекомендуется выполнять измерение связующих точек в автоматическом режиме. Сначала необходимо построить накидной монтаж блока в основном окне проекта, используя окно «Накидной монтаж» (рис. 1.4).

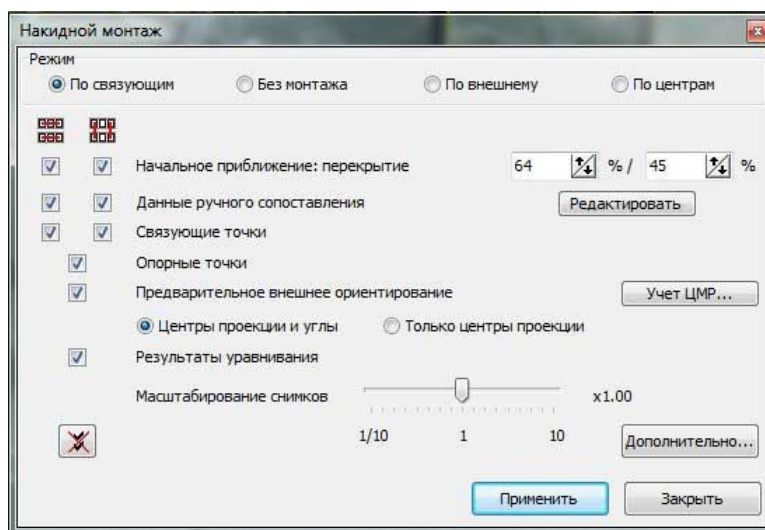


Рис. 1.4. Настройка параметров для создания накидного монтажа

Затем, запустив окно «Автоматическое измерение связующих точек», задаем параметры измерения, переноса и фильтрации точек (рис. 1.5)

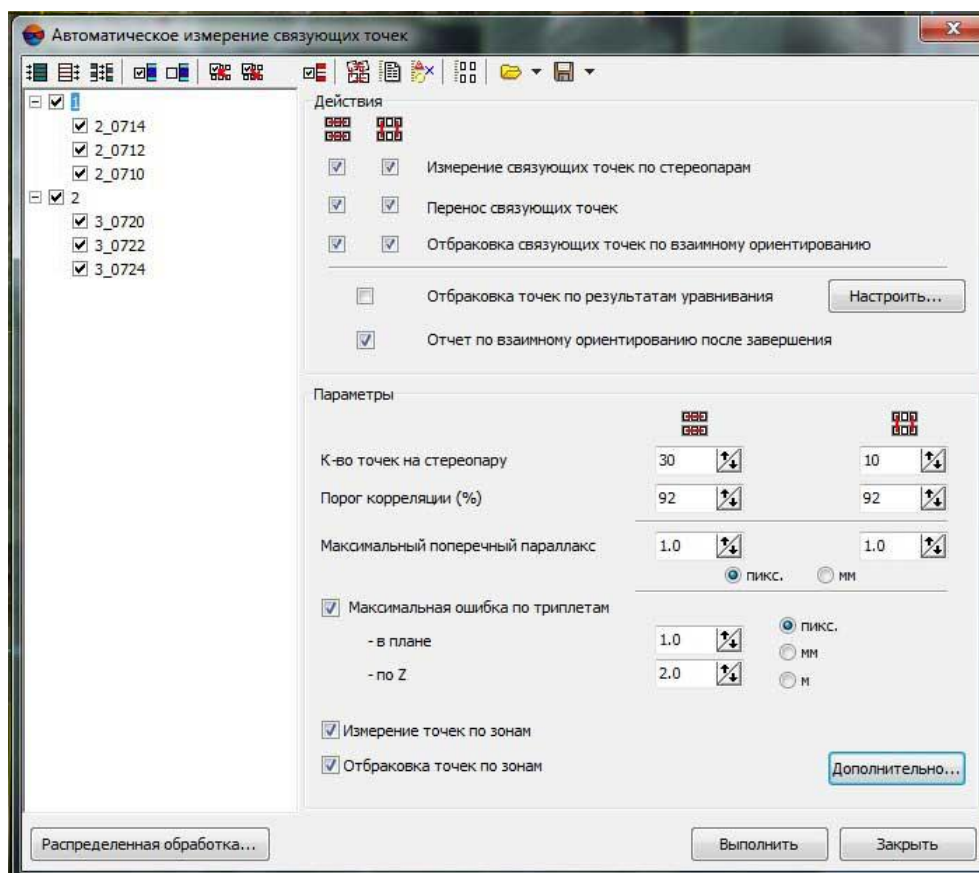


Рис. 1.5. Настройка параметров для автоматического измерения связующих точек

Здесь необходимо выставить пороговые значения величин, которые позволят нам провести контроль качества выполненных измерений на всех этапах создания сети фототриангуляции:

1. по коэффициенту корреляции

При добавлении точек в автоматическом режиме или вручную с использованием коррелятора происходит расчет значения коэффициента корреляции, его значение отображается в таблице «Точки триангуляции» окна «Измерение точек» См. рис. 1.6. Приемлемое значение коэффициента корреляции определяется пользователем, исходя из фотографического качества снимков. Для контрастных и четких снимков это значение составляет 0,9 — 0,95, для снимков с большим смазом допустимое значение коэффициента может быть 0,80 на хорошо распознаваемых точках.

2. по остаточным поперечным параллаксам

После измерения 5 точек на стереопаре вычисляются элементы взаимного ориентирования пары снимков, которые уточняются по мере добавления точек, и в таблице «Точки триангуляции» (в окне Измерение точек) отображаются значения остаточных поперечных параллаксов на точках в выбранных единицах измерения – миллиметрах или пикселах. См. рис. 1.6.

Средняя ошибка не должна превышать половины размера пиксела сканирования для аналоговой камеры и половины размера пиксела матрицы для цифровой камеры. То есть, если размер пиксела сканирования 12 мкм, то средняя ошибка взаимного ориентирования не должна превышать 6 мкм, а при размере пиксела матрицы 9 мкм – 4,5 мкм.* См. также Приложение 1

Таким образом, в описанном случае допуски на максимальные ошибки — 12 мкм и 9 мкм для аналоговой и цифровой камеры соответственно.

3. по плановым и высотным ошибкам на точках в области тройного и более перекрытия

После измерения точек на стереопаре в области двойного перекрытия необходимо перенести на соседние модели точки, попадающие в зону тройного перекрытия. На этих точках рассчитываются ошибки определения координат в соседних моделях. Они отображаются в таблице «Точки триангуляции» в окне «Измерение точек». См. рис. 1.6

Средние ошибки в плане не должны превышать половины размера пиксела, умноженного на $\sqrt{2}$, а по высоте — средней ошибки, умноженной на отношение фокусного расстояния камеры к базису съемки:

$$E_{xy\text{ ср}} = \sqrt{2} \cdot 0,5\text{пикс}$$

$$E_{z\text{ ср}} = f/b \cdot E_{xy\text{ ср}}$$

См. также Приложение 1

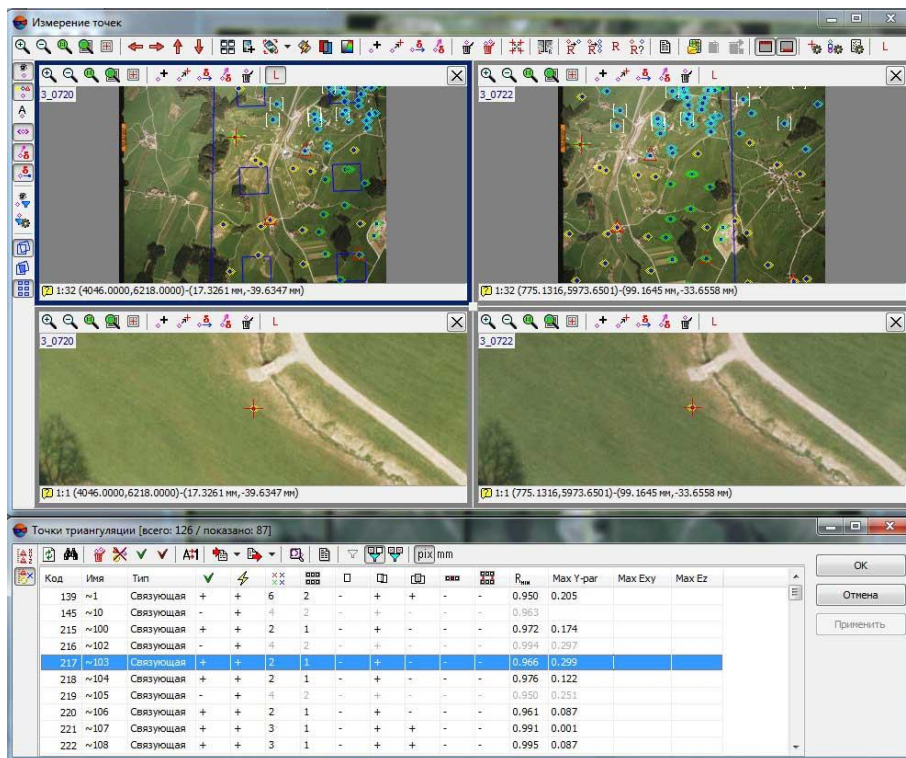


Рис. 1.6. Контроль качества измерений связующих точек триангуляции в окне «Измерение точек»

Приблизительное значение базиса фотографирования можно рассчитать по формулам:

$$1) b_x = l_x \cdot (100\% - p_x) / 100\%$$

где b_x — базис фотографирования в масштабе снимка (мм);

l_x — размер снимка вдоль оси X (мм);

p_x — продольное перекрытие в % (в общем случае 60%).

2) $b_x = X_{\text{лев}} - X_{\text{прав}}$, где $X_{\text{лев}}$ и $X_{\text{прав}}$ — координаты связующей точки на левом и правом снимке (мм).

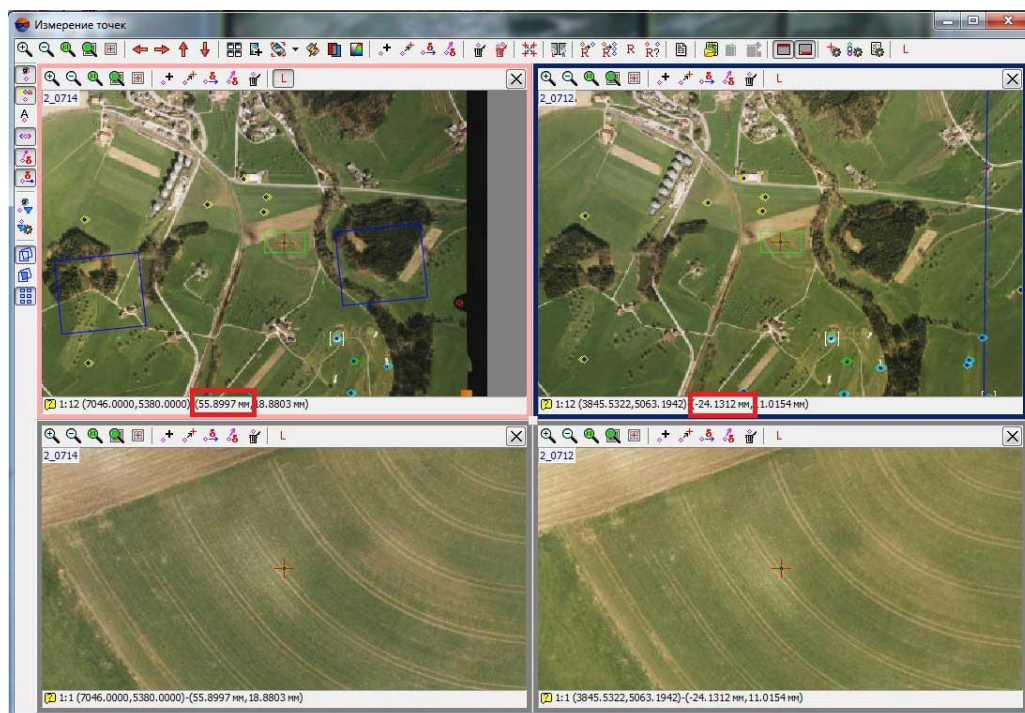


Рис. 1.7. Координаты соответствующей точки на левом и правом изображениях

В таблице 1 приведены краткие характеристики наиболее популярных съемочных систем

Камера	Фокусное расстояние (мм)	Размер снимка (пкс)	Размер пикселя (мкм)
БПЛА			
Sony RX1 RM2	35	5304/7952	4.5
Sony A6000	20	4000/6000	4
DJI FC6310	8.8	3648/5472	2.4
PhaseOne iXM-100	80	11664 / 8750	3.76
Профессиональные камеры			
UltraCam Eagle M3	80	26 460 / 17 004	4.0
DMC II ₂₅₀	112	17 216 / 14 656	5.6
DMCIII	92 (PAN) 45 (MC)	25 728 /14 592 (PAN) 8 956/6 708 (MC)	3.9 (PAN) 6.0 (MC)

Таблица 1. Краткая характеристика съемочной систем

В таблице 1.1. приведены допуски на средние ошибки в триплетах для изображений формата 23×23 см, полученных аналоговой камерой, с пикселом сканирования 12 мкм, продольным перекрытием 60% и трех стандартных для аналоговых камер фокусных расстояний.

f (мм)	Средняя ошибка (мм)	
	в плане	по высоте
90	0,008	0,008
150	0,008	0,014
300	0,008	0,028

Таблица 1.1. Допуски на средние ошибки в триплетах для аналоговых изображений
**Далее при употреблении словосочетания «размер пикселя» имеется в виду размер пикселя сканирования для аналоговых камер и размер пикселя матрицы для цифровых камер.*

См. также Приложение 1

В таблице 1.2. приведены средние ошибки в триплетах для изображений, полученных различными цифровыми камерами, с перекрытием 60%.**

Камера	Фокусное расстояние f (мм)	Размер пиксела (мм)	Формат кадра (пикс)(мм)	Базис (мм)	$E_{xy\text{ ср}}$ (мм)	$E_{z\text{ ср}}$ (мм)
DMC	120	0,012	7680x13824 92,2x165,9	36,88	0,008	0,028
DSS	55	0,009	4092x4077 36,8x36,7	14,8	0,006	0,024
UltraCamD	100	0,009	7500x11500 67,5x103,5	27,00	0,006	0,024
UltraCamX	100	0,007	9420x14430 67,8x103,9	27,12	0,005	0,019

Таблица 1.2. Допуски на средние ошибки в триплетах для цифровых изображений

См. также Приложение 1

***во многих случаях съемка цифровыми камерами производится с продольным перекрытием 80-90%, поэтому соотношение f/b увеличивается, следовательно, увеличиваются и значения ошибок в триплетах по высоте.*

После выполнения взаимного ориентирования снимков внутри маршрутов, выполняется измерение межмаршрутных точек.

Рекомендуемая технология ручного измерения межмаршрутных точек:

- 1) измерить по 2-3 точки на каждую межмаршрутную стереопару (рекомендуется размещать точки в «верхней» и «нижней» части поперечного перекрытия);
- 2) перенести каждую точку на одно соседнее изображение в каждом маршруте, контролируя значения остаточных поперечных параллаксов на точках внутри каждой стереопары, где была добавлена новая точка (см. таблицу «Точки триангуляции» окна «Измерение точек»). Сводную статистику по открытым изображениям можно увидеть, запустив «Отчет по взаимному ориентированию» из окна «Измерение точек» соответствующей кнопкой панели инструментов.

После измерения межмаршрутных точек, необходимо проконтролировать взаимное ориентирования снимков по всему блоку.

В случае автоматического измерения связующих точек после завершения работы алгоритма выдается Отчет по взаимному ориентированию, где приведена статистика по внутримаршрутным и межмаршрутным измерениям по всему блоку.

Также он может быть открыт из основного окна проекта соответствующим пунктом меню «Ориентирование» или соответствующей кнопкой панели инструментов «Триангуляция». Сначала открывается окно «Параметры отчета по взаимному ориентированию», где необходимо задать допустимые значения остаточного поперечного параллакса и ошибок в триплетах и указать единицы измерения. Затем открывается отчет, где цветом будут отмечены превышения допусков. В случае необходимости, из этого окна можно открыть проблемную стереопару или триплет и отредактировать измерения.

После выполнения и контроля ошибок взаимного ориентирования (ошибки не превышают заданных допусков), переходим к уравниванию блока.

2. Уравнивание блока (PHOTOMOD Solver)

На данном этапе выполняется уравнивание блочных и маршрутных сетей фототриангуляции. Сначала рекомендуется произвести уравнивание без участия опорных

точек, то есть уравнивать в свободной модели. В ходе уравнивания будут определены ошибки по связи, которые характеризуют качество фотограмметрических измерений.

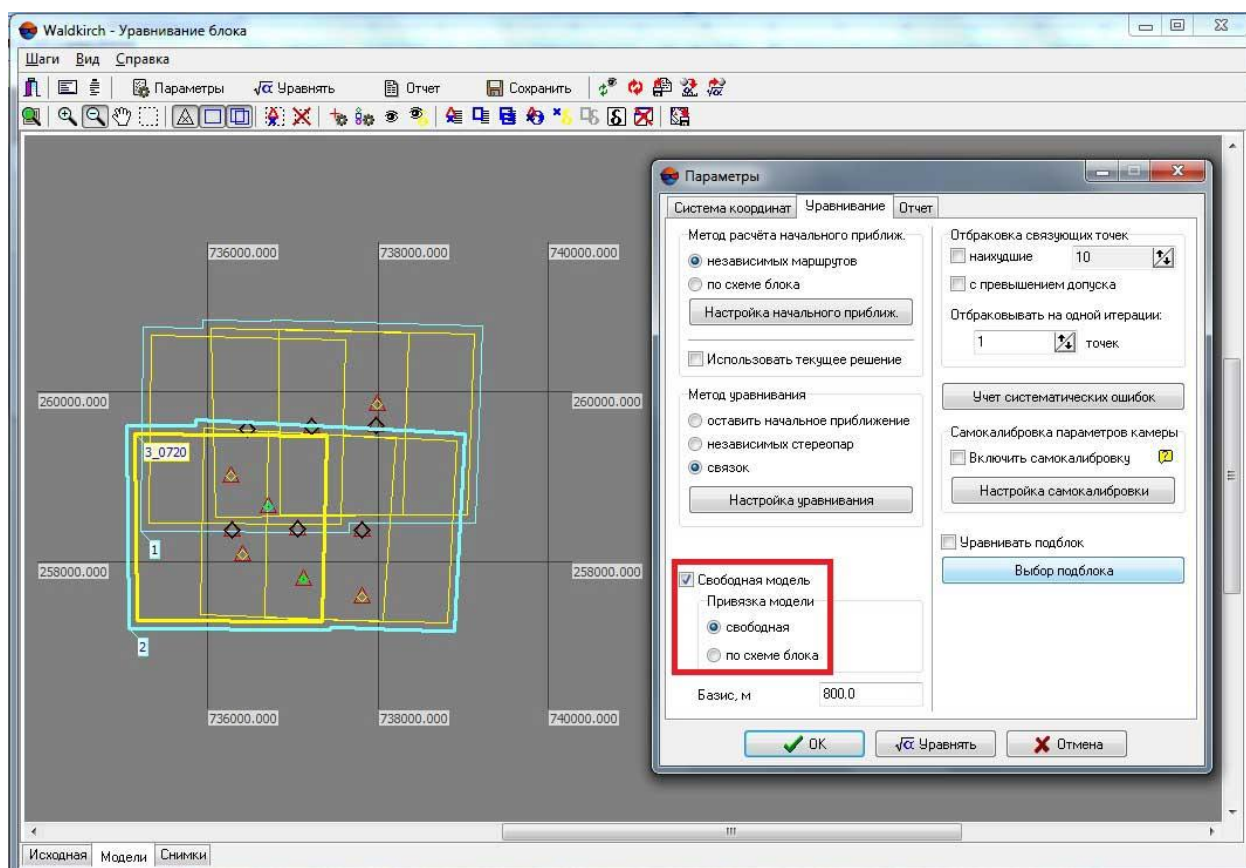


Рис. 2.1. Уравнивание в свободной модели

Чтобы оценить ожидаемую точность при уравнивании с использованием опорных точек, необходимо задать базис фотографирования в метрах в окне **Параметры** на закладке **Уравнивание**. Здесь же выбирается метод уравнивания.

Если при уравнивании в свободной модели были получены результаты, удовлетворяющие заданной точности, можно переходить к уравниванию с использованием опорных точек. Ожидаемая точность этого уравнивания будет не выше точности, полученной при уравнивании свободной модели.

Ниже приведены допуски на те или иные ошибки уравнивания в зависимости от конечного продукта обработки — топографические карты, ортофотопланы.

2.1. Точность уравнивания при создании топографических карт

Опорные точки

Средняя ошибка на опорных точках после внешнего ориентирования не должна превышать 0,2 мм в масштабе карты (плана) в плане и $0,15h_{\text{сеч}}$ по высоте, где $h_{\text{сеч}}$ — высота сечения рельефа для масштаба создаваемой карты.

Контрольные точки

Средняя ошибка планового положения — 0,3 мм в масштабе карты (плана)

Средняя ошибка по высоте на контрольных точках:

- 1) $0,2 \cdot h_{\text{сеч}}$ — при съемке с высотой сечения 1 м, а также при съемке с высотой сечения 0,5 м для масштабов 1:500 и 1:1000;
- 2) $0,25 \cdot h_{\text{сеч}}$ — при съемке с высотой сечения 2,5 м, а также при съемке с высотой сечения 0,5 м для масштаба 1:2000;
- 3) $0,35 \cdot h_{\text{сеч}}$ — при съемке с высотой сечения 5 м и 10 м.

Масштаб		Допуск			
		опорные		контрольные	
	$h_{сеч}$	в плане	по высоте	в плане	по высоте
1:2000	1	0,4	0,15	0,6	0,2
1:10000	2,5	2	0,38	3	0,625
1:25000	5	5	0,75	7,5	1,75

Таблица 2.1. Допуски на средние ошибки уравнивания на опорных и контрольных точках
См. также Приложение 1

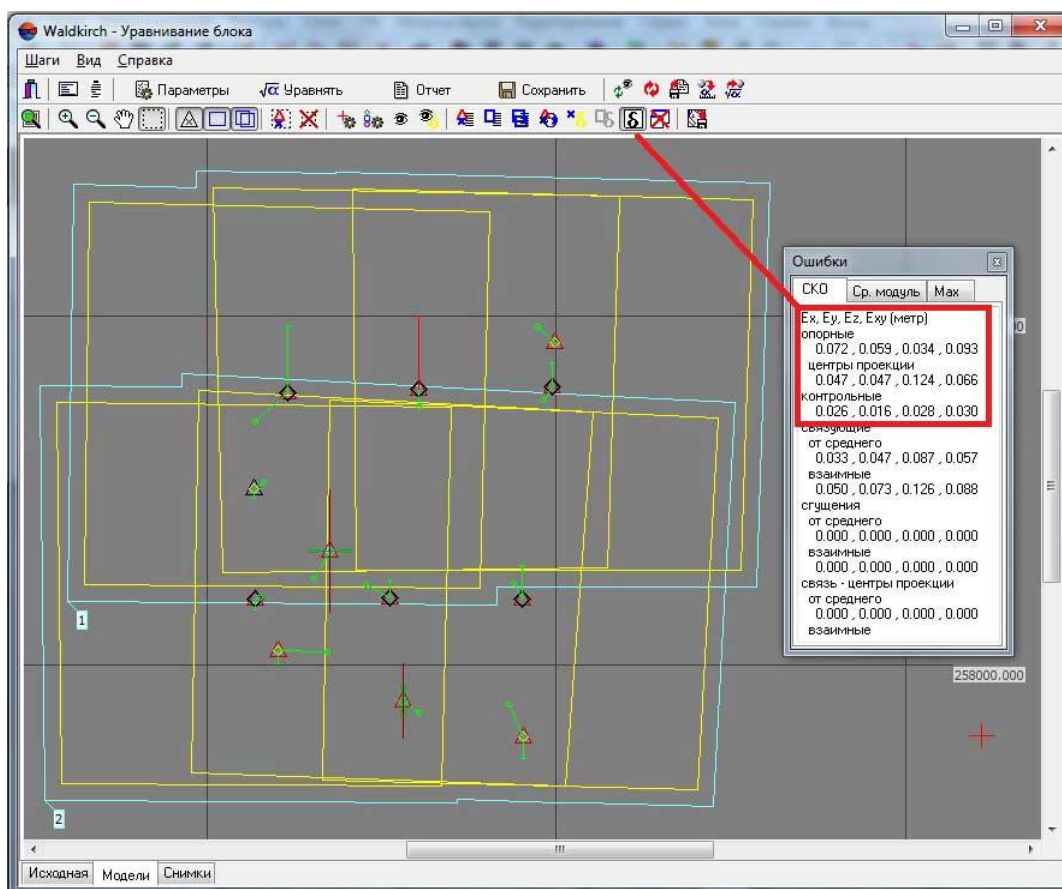


Рис. 2.2. Контроль средних ошибок уравнивания на опорных и контрольных точках

2.2. Точность уравнивания при создании ортофотопланов

Опорные точки

Средняя ошибка в плане — 0,2 мм в масштабе создаваемой карты (плана).

Средняя ошибка по высоте — $1/3\Delta h_{ЦМР}$, где $\Delta h_{ЦМР}$ — средняя ошибка ЦМР.

Контрольные точки

Средняя ошибка в плане — 0,3 мм в масштабе создаваемой карты (плана).

Средняя ошибка по высоте — $1/3\Delta h_{ЦМР}$, где $\Delta h_{ЦМР}$ — средняя ошибка ЦМР.

Допуски на ошибку $\Delta h_{ЦМР}$ смотрите в разделе документации «Обработка проекта» — «Создание цифровой модели рельефа».

В таблице 2.2.1. Приведены допуски на средние ошибки уравнивания при создании ортофотопланов по цифровым снимкам

Масштаб	Камера	Допуск (м)			
		Опорные		Контрольные	
		В плане	По высоте	В плане	По высоте
1:2000	Sony RX1 RM2	0,4	0,32	0,6	0,32
	Sony A6000		0,27		0,27
	DJI FC6310		0,22		0,22
	PhaseOne iXM-100		0,58		0,58
	UltraCam Eagle M3		0,25		0,25
	DMC II ₂₅₀		0,35		0,35
	DMCIII		0,26		0,26
1:10000	Sony RX1 RM2	2	1,63	3	1,63
	Sony A6000		1,38		1,38
	DJI FC6310		1,12		1,12
	PhaseOne iXM-100		2,92		2,92
	UltraCam Eagle M3		1,27		1,27
	DMC II ₂₅₀		1,77		1,77
	DMCIII		1,33		1,33
1:25000	Sony RX1 RM2	5	4,01	7,5	4,01
	Sony A6000		3,47		3,47
	DJI FC6310		2,79		2,79
	PhaseOne iXM-100		7,3		7,3
	UltraCam Eagle M3		3,18		3,18
	DMC II ₂₅₀		4,09		4,09
	DMCIII		3,33		3,33

Таблица 2.2.1. Допуски на средние ошибки уравнивания при создании ортофотопланов по цифровым снимкам

В таблице 2.2.2. приведены допуски на средние ошибки уравнивания на опорных и контрольных точках для создания ортофотопланов по аналоговым снимкам формата 23x23 см.

Масштаб	f (мм)	Допуск			
		опорные		контрольные	
		в плане	по высоте	в плане	по высоте
1:2000	90	0,4	0,13	0,6	0,13
	150		0,22		0,22
	300		0,45		0,5
1:10000	90	2	0,67	3	0,67
	150		1,12		1,12
	300		2,24		2,24
1:25000	90	5	1,68	7,5	1,68
	150		2,80		2,80
	300		5,59		5,59

Таблица 2.2.1. Допуски на средние ошибки уравнивания при создании ортофотопланов по аналоговым снимкам формата 23×23 см.

См. также Приложение 1

Средние ошибки на опорных и контрольных точках после уравнивания для создания ортофотопланов по цифровым снимкам:

Масштаб	Камера	Допуск			
		опорные		контрольные	
		в плане	по высоте	в плане	по высоте
1:2000	DMC	0,4	0,27	0,6	0,27
	DSS		0,51		0,51
	UltraCamD		0,36		0,36
	UltraCamX		0,36		0,36
1:10000	DMC	2	1,37	3	1,37
	DSS		2,57		2,57
	UltraCamD		1,80		1,80
	UltraCamX		1,79		1,79
1:25000	DMC	5	3,43	7,5	3,43
	DSS		6,42		6,42
	UltraCamD		4,50		4,50
	UltraCamX		4,48		4,48

Таблица 2.2.2. Допуски на средние ошибки уравнивания при создании ортофотопланов по цифровым снимкам

См. также Приложение 1

3. Построение ЦМР

Цифровая модель рельефа (ЦМР) характеризуется ошибкой по оси Z, допуск на которую зависит от выходного продукта фотограмметрической обработки. Ниже приведены таблицы допусков в зависимости от масштаба выходного ортофотоплана и параметров съемочной системы.

Допуск на среднюю ошибку ЦМР $\Delta h_{\text{ЦМР}}$ при построении ортофотоплана рассчитывается по следующей формуле:

$\Delta h_{\text{ЦМР}} = (0,3 \text{ мм} \cdot f \cdot M) / r$ где 0,3мм — графическая точность топографической карты (плана);

f — фокусное расстояние съемочной камеры (мм);

M — знаменатель масштаба создаваемой карты (плана);

r — максимальное удаление точки снимка от точки надира (мм), равное половине диагонали рабочей зоны.

Значения радиуса рабочей зоны для цифровых снимков, полученных различными камерами при съемке с 60%-ым перекрытием.

Для аналоговых снимков формата 23×23 см при продольном перекрытии 60% область перекрытия имеет размеры 13,8×23 см. Таким образом, радиус r приблизительно равен 124 мм.

В таблице 3.1 приведены допуски на средние ошибки $\Delta h_{\text{ЦМР}}(м)$ для радиуса рабочей площади аналоговых снимков 124 мм в зависимости от масштаба создаваемой карты и фокусного расстояния.

Масштаб	Фокусное расстояние (мм)		
	90	150	300
1:2000	0,4	0,7	1,3
1:10000	2,0	3,4	6,7
1:25000	5,0	8,4	16,8

Таблица 3.1. Допуски на средние ошибки ЦМР $\Delta h_{\text{ЦМР}}$ для $r = 134$ мм на аналоговых снимках

См. также Приложение 1

В таблице 3.2. приведены значения радиуса рабочей зоны для цифровых снимков, полученных различными камерами при съемке с 60%-ым перекрытием.

Камера	Формат кадра (пикс) (мм)	Базис (мм)	Радиус рабочей зоны (мм)
Sony RX1 RM2	5304/7952 23,87/35,78	9,55	21,5
Sony A6000	4000/6000 16/24	6,4	14,42
DJI FC6310	3648/5472 8,75/13,13	3,5	7,89
PhaseOne iXM-100	11664 / 8750	17,54	27,38

	43,85/32,81		
UltraCam Eagle M3	26 460 / 17 004 105,84/68,01	42,336	62,9
DMC II ₂₅₀	17 216 / 14 656 96,41/82,07	38,56	63,3
DMC III	8 956/6 708 53,73/40,25	21,49	33,57

Таблица 3.2. Радиус рабочей зоны на цифровых снимках при съемке с 60%-ым перекрытием

В таблице 3.3. приведены допуски на средние ошибки $\Delta h_{\text{ЦМР}}$ (м) для цифровых снимков с 60% перекрытием, полученных различными камерами, в зависимости от масштаба выходного ортофотоплана.

Масштаб	Допуск (м)						
	Камера						
	Sony RX1 RM2	Sony A6000	DJI FC6310	PhaseOne iXM-100	UltraCam Eagle M3	DMC II ₂₅₀	DMC III
1:2 000	0,96	0,83	0,67	1,75	0,76	1,06	0,8
1:10 000	4,88	4,16	3,35	8,76	3,81	5,31	4,0
1:25 000	12,02	10,4	8,36	21,91	9,53	12,27	10,0

Таблица 3.3. Допуски на средние ошибки ЦМР $\Delta h_{\text{ЦМР}}$ для цифровых снимков (перекрытие 60%)

См. также Приложение 1

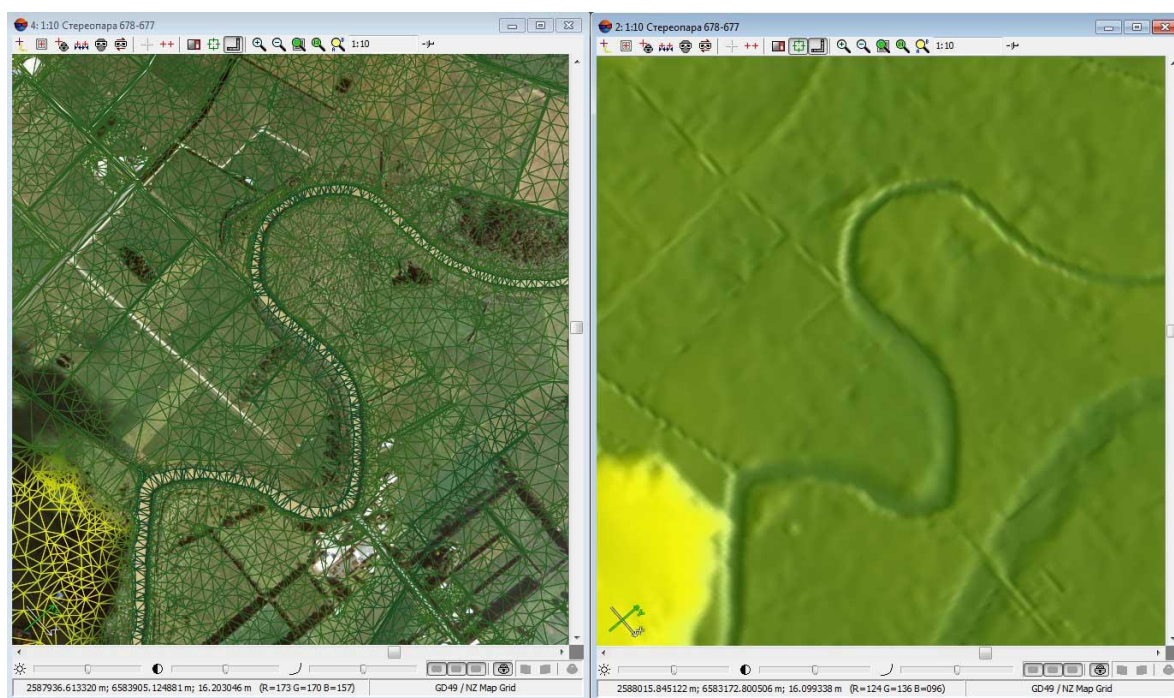


Рис. 3.1. ЦМР в виде TIN и матрицы высот

4. Построение ортофотоплана (PHOTOMOD Mosaic)

Контроль точности ортофотоплана осуществляется по опорным/контрольным точкам и по линиям совмещения фрагментов (порезам).

Допуск на ошибку в плановом положении опорных и контрольных точек составляет 0,5 мм в масштабе фотоплана для равнинных и всхолмленных районов и 0,7 мм — для горных.

Допуски на несовмещение контуров по порезам составляют 0,7 мм и 1 мм в масштабе создаваемого фотоплана для равнинных и горных районов соответственно.

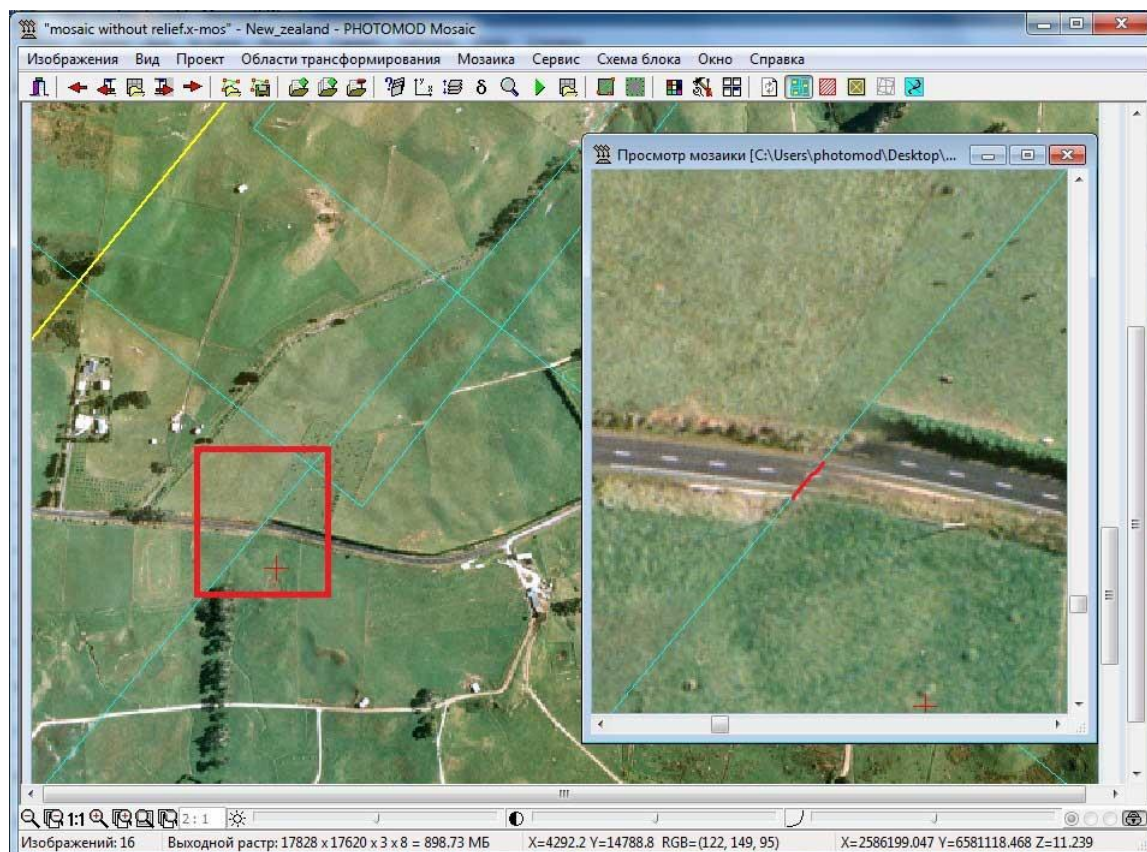


Рис. 4.1. Несовмещение контуров по порезам

PHOTOMOD Mosaic позволяет осуществить контроль фотоплана по опорным и контрольным точкам автоматически (кнопка Контроль точности). Ниже приведены допуски на ошибки в плановом положении опорных и контрольных точек в зависимости от масштаба ортофотоплана.

Масштаб	Средняя ошибка (м)	
	Равнинная местность	Горная местность
1:2000	1	1,4
1:10000	5	7
1:25000	12,5	17,5

Таблица 4.1. Допуски на ошибки в плановом положении опорных и контрольных точек в зависимости от масштаба ортофотоплана

См. также Приложение 1

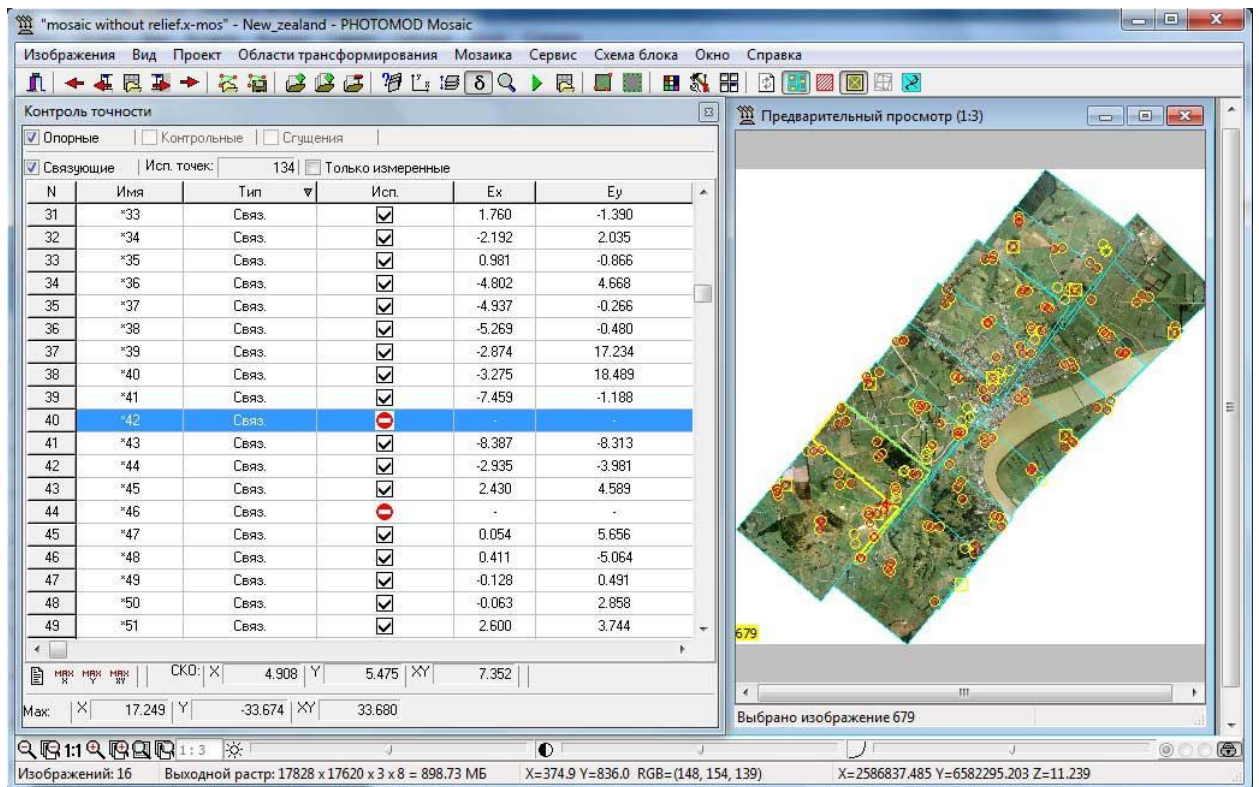


Рис. 4.2. Автоматический контроль точности по точкам сети фототриангуляции
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Примерное соотношение средней, среднеквадратической и максимальной ошибок:

$$E_{\max} \approx 2 \cdot E_{\text{ср}} ; \text{СКО} \approx \sqrt{2} \cdot E_{\text{ср}}$$

Литература

1. А. Н. Лобанов, М. И. Буров, Б. В. Краснопевцев. Фотограмметрия. М.: «Недра», 1987.
2. А. П. Михайлов, А. Г. Чибуничев. Лекции по фотограмметрии. М., 2005.
3. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. М.: ЦНИИГАиК, 2002.